https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.249



饶阳凹陷沙一下亚段优质烃源岩地球 化学特征及成藏贡献

杨 帆^{1,2,3},王 权⁴,郝 芳⁵,郭柳汐⁴,邹华耀^{2,3}

1. 中国石油勘探开发研究院,北京 102249

2. 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249

3. 中国石油大学地球科学学院,北京 102249

4. 中国石油华北油田分公司勘探开发研究院,河北任丘 062552

5. 中国石油大学地球科学与技术学院,山东青岛 266580

摘 要:为了研究饶阳凹陷沙一下亚段优质源岩的地球化学特征及其成藏贡献.基于有机碳、热解、生烃模拟实验评价源岩生 烃潜力;基于源岩GC-MS实验和生烃潜力评价结果,描述源岩分子地球化学及有机相特征,利用多元数理统计方法,建立油 一岩关系并定量计算原油中各源岩贡献率,总结了沙一下亚段成藏贡献规律.研究表明:沙一下亚段源岩的生烃潜力在凹陷 内发育的3套源岩中最大,并且ω(伽马蜡烷)/ω(C₃₀藿烷)、ω(甾烷)/ω(藿烷)等生物标志物参数与其他两套源岩有明显区 别.原油样品可以划分为沙一下亚段来源,沙一下和沙三段混源和沙三上和下段混源3种成因类型.成藏贡献计算结果显示 沙一下亚段源岩总贡献率达到58%,对东营组、馆陶和明化镇组原油贡献达到77%,对沙河街组原油贡献达到66%.饶阳凹陷 沙一下亚段源岩是一套非常优质的烃源岩,成藏贡献大,应得到更多关注.沙一下亚段源岩高贡献区分布受到地质条件、成藏 模式和源岩有机相控制,古近系和新近系储层原油主要来源于沙一下亚段源岩.

关键词: 饶阳凹陷;沙一下亚段源岩;地球化学;油源对比;成藏贡献. 中图分类号: P632 文章编号: 1000-2383(2021)01-172-14 收稿

收稿日期:2019-09-29

Biomarker Characteristics of Lower Sub-Member of the First Member of the Shahejie Formation and Its Accumulation Contribution in Raoyang Depression, Jizhong Sub-Basin

Yang Fan^{1,2,3}, Wang Quan⁴, Hao Fang⁵, Guo Liuxi⁴, Zou Huayao^{2,3}

1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 102249, China

2. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

3. Faculty of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

4. Exploration and Development Research Institute, Huabei Oilfield Company, CNPC, Renqiu 062552, China

5. Faculty of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China

Abstract: In order to study the geochemical characteristics and accumulation contribution of a high-quality source rock, lower submember of the first member of the Shahejie Formation $(E_{2}s_{1}^{L})$, in Raoyang depression. Based on experimental data of TOC, pyrolysis, hydrocarbon generation simulation, the hydrocarbon generation potential of source rocks was evaluated, and in

引用格式:杨帆,王权,郝芳,等,2021.饶阳凹陷沙一下亚段优质烃源岩地球化学特征及成藏贡献.地球科学,46(1):172-185.

基金项目:国家重大基金项目(No. 41690134);国家自然科学基金项目(No. U1663210);中国石油华北油田科技项目"饶阳-霸县凹陷环境-生物协同演化与优质烃源岩发育分布及其成藏贡献研究"(No. HBYT-YJY-2014-JS).

作者简介:杨帆(1993—),男,博士研究生,主要从事油气地球化学,油气成藏等研究. ORCID:0000-0002-9838-9450. E-mail: chinaofjz@163. com

combination with GC - MS experimental data and the result of hydrocarbon generation evaluation, molecular geochemical characteristics and organic phase characteristics were described. Furthermore, by using multi-dimensional statistical methods, oil-rock correlation was established, and the contribution rate of each source rock was quantified as well as the law of accumulation contribution of $E_2s_1^{L}$ was summarized. The research indicates that the hydrocarbon generation potential of the $E_2s_1^{L}$ is the highest among the three developed sets of source rocks. The biomarker parameters such as gammacerane- C_{30} hopane ratio, sterane-hopane ratio are significantly different from the other two sets of source rocks. The crude oil samples were divided into three types, including E_2s_3 type, mixed type derived from E_2s_3 and $E_2s_1^{L}$, and $E_2s_1^{L}$ type. The bulk contribution rate of the $E_2s_1^{L}$ in the Raoyang Depression reaches 58%. The $E_2s_1^{L}$ source rock in the Raoyang sag is a high-quality source rock, which has a great contribution to the oil accumulation of the Raoyang depression and should get paid more attention. The high contribution areas of are controlled by geological conditions and accumulation models, and also controlled by source rock organic facies. Crude oil reserves in the Paleogene and Neogene reservoirs is primarily contributed by the $E_2s_1^{L}$.

Key words: Raoyang depression; $E_{2\delta_1}^{L}$; geochemistry; oil-source correlation; accumulation contribution.

0 引言

渤海湾裂谷盆地是中国最富油盆地之一,面积 大约18×10⁴km²,具有石油资源量225×10⁸t,中国 近三分之一的石油产量来自于渤海湾盆地(Hao et al., 2009, 2012). 饶阳凹陷位于渤海湾盆地西部次 盆之一的冀中坳陷,勘探面积约为6300 km²,从20 世纪60年代钻探开始至今,油气探明储量达6亿 吨,占冀中坳陷的60%.饶阳、霸县、廊固等冀中坳 陷主要的潜力区均为湖相沉积,但源岩发育层段有 差异,霸县、廊固主要发育烃源岩沙四段(E₁s₄)和沙 三段(E₂s₃), 而饶阳凹陷发育有沙三段(E₂s₃)和沙一 下亚段(E251L)源岩,E251L是古近纪早渐新世湖进时 期形成的一套大面积分布、发育稳定且生烃潜力大 的优质源岩(谢玉洪等,2018),饶阳凹陷在冀中坳 陷中占据如此巨大的资源潜力很有可能与这套优 质源岩有关.虽然渤海湾地区沙一段优质源岩的生 烃潜力评价已取得较丰富研究成果(Hao et al., 2007, 2010),但对于饶阳凹陷沙一下亚段源岩的研 究却因为之前的重要勘探发现集中在中一深层、潜 山油藏而未获得足够重视.随着近年越来越多的中 浅层油气被发现使 E2S1上源岩的生烃潜力评价工作 变得愈发迫切(易士威等,2010;刘华等,2011;赵利 杰等,2012a,2012b). 饶阳凹陷内原油成因类型及 来源也有一定研究基础(田福清,2008;王建等, 2009),但前人的研究工作主要基于色质谱图形态 和二元参数对比等结果,主观认识造成的误差较 大,并且主要是针对局部成藏区带的油一岩关系探 讨,但饶阳凹陷内已发现12个油田(有利成藏带)和 7个获工业油流的产层,呈现油田散布,油层组众多 的特点,因此前人的研究基础对于科学有效地建立 起全凹陷的油一岩关系是不足够的.通过渤海湾 盆地对沙一段源岩的研究显示它具有很大的生烃 潜力(Hao et al., 2007, 2010),推测饶阳凹陷沙一 下亚段贡献的石油资源量应该也相当丰富,定量 评价沙一下亚段成藏贡献并总结成藏规律是找到 这些资源的基础,也能为老油田精细勘探工作提 供一定帮助.但饶阳凹陷发育复杂的断裂系统, 生储盖组合、输导体系关系多样,成藏模式丰富, 成藏贡献难以确定,因此需要通过科学的分析计 算方法研究沙一下亚段的成藏贡献.

综上原因,本文评价了饶阳凹陷沙一下亚段 源岩的生烃潜力,区分了各套源岩生物标志物组 合等地球化学特征,建立了饶阳凹陷的油一岩关 系,借助多元数理统计方法在样品多维空间参数 描述的优势,划分了饶阳凹陷多油田多层位原油 样品成因类型并计算出不同源岩贡献比例,总结 出沙一下亚段来源油的贡献分布特征.

1 地质概况

饶阳凹陷基底为前第三系古隆起,饶阳凹陷 东侧受马西一河间一留路断裂带的控制,西侧是 古基底之上继承性发育的第三系(古近系)蠡县 斜坡,发育多个生烃洼槽,主要包括马西洼槽、河 间洼槽、留西洼槽、武强洼槽,E₂S₁[⊥]优质源岩基本 全凹陷洼槽都有分布(图1).

饶阳凹陷同裂谷沉降时期的沉积物从老到新 有孔店组(E_1k , 65.0~50.5 Ma),沙河街组(E_2s , 50.5~32.8 Ma)和东营组(E_3d , 32.8~24.6 Ma),主 要在河流一湖相环境中沉积.后裂谷热沉降期主要 沉积了馆陶组(Ng, 24.6~12.0 Ma),明化镇组



图 1 饶阳凹陷主要洼槽、油田分布 Fig.1 Primary sags and the location of oil fields of Raoyang depression

(Nm, 12~2 Ma)和平原组 (Qp, 2~0 Ma),它们主要是河流沉积物.孔店组一沙四段时期是初始裂陷期,山峦起伏,地形高差大,饶阳凹陷主要发育冲积扇和河流相,多为红色泥岩和砂、砾岩.沙三段湖盆扩张深陷,在凹陷的负向洼槽区多发于半深湖一深湖相,是研究区重要的烃源岩发育时期.沙二段发生湖盆扩展期的水退,湖盆收缩变浅,物源丰富,地形平缓,发育三角洲和河流沉积.沙一下时期又发生水进,凹陷内大面积发育湖相沉积,湖深较小,但也发育了优质的烃源岩. 自沙一上开始发生水退式沉积,主要发育河流沉积.东营组开始已由断陷阶段转化为坳陷阶段,进入准平原化阶段(杨帆,2016).

饶阳凹陷发育 E₂s₃和 E₂s₁[⊥]源岩,其中 E₂s₃段源 岩因为沉积时间长,厚度可达 800 m,沉积环境变化 导致地球化学特征差异,因此可将 E₂s₃源岩细分为 (沙三上亚段)E₂s₃^U和(沙三下亚段)E₂s₃^L.已发现原 油在奥陶系、寒武系和蓟县系雾迷山组潜山油藏, 明化镇组、馆陶组、东营组和沙河街组砂岩储层,主要的区域性盖层是东营组三段和二段,E₂₀₁^L也有一定遮挡作用(杨帆,2016).

2 沙一下亚段烃源岩地球化学特征

2.1 生烃潜力

饶阳凹陷内沙一下亚段源岩性主要是油页岩, 少量泥页岩和灰质泥岩,普遍具有非常高的生烃潜力.实验结果显示沙一下亚段源岩的TOC,热解 S_1+S_2 峰值和氢指数(HI)有很大差异.图2和图3 显示饶阳凹陷沙一下亚段源岩的发育质量在平面 上不同的洼槽具有明显的差异,任西洼槽的TOC 从1.14%到 6.20%,热解 S_1+S_2 峰值从 0.89 mg HC/g rock到52.43 mg HC/g rock,只有一个样品落 在中等烃源岩范围,其余样品热解 S_1+S_2 都大于 6 mg HC/g rock,属于优质烃源岩.马西洼槽的样品 TOC 从 1.13%到 3.42%,热解 S_1+S_2 从 6.19 到



图 2 饶阳凹陷沙一下亚段 T_{max}(℃)和 HI(hydrogen index) (mg HC/g TOC)的关系

Fig.2 Relationship of T_{max} (°C) vs. *HI* (mg HC/g TOC) for the $E_2s_3^{\text{L}}$ in the Raoyang depression

28.33 mg HC/g rock,这些样品都是优质烃源岩.河 间、留西洼槽的样品 TOC 从 0.18% 到 3.83%, 热解 $S_1 + S_2$ 峰值从 0.96 mg HC/g rock 到 24.47 mg HC/ grock,25个样品是优质烃源岩,17个样品是中等源 岩,只有2个样品是差源岩.取自武强洼槽的样品 TOC 从 0.33% 到 1.39%, 热解 $S_1 + S_2$ 从 0.17 到 8.96 mg HC/g rock, 2个样品是优质源岩有1个中 等源岩和6个样品是差源岩.任西洼槽样品的氢指 数(HI)从341到785 mg HC/g TOC,有2个样品有 机质类型是Ⅰ型,其余26个样品都是Ⅱ型.来自马 西洼槽样品的 HI从 355 到 806 mg HC/g TOC,其 中32个样品是I型,但是R。小于0.5%,还有12个样 品是II型.河间、留西洼槽样品的HI从101到553 mg HC/g TOC,样品都是 II 型,武强洼槽样品的 HI 从48到485mg HC/g TOC,5个样品是III型,R。都 小于0.5%,其余4个样品是II型.

烃源岩生烃热模拟实验可以有效反映源岩生 烃潜力.本文实验选取了饶阳凹陷沙一下亚段、沙 三上亚段和沙三下亚段3个岩心样品,采用封闭体 系黄金管加水热模拟系统,使用的黄金管一高压釜 设备由中国科学院广州地球化学研究所自主研制, 实验流程包括样品粉碎、干酪根制备、样品封装入 釜、设备升温、气态和液态烃收集、分析等.实验条 件:热模拟压力为50 MPa(±2 MPa),温度为



图 3 饶阳凹陷沙一下亚段 TOC(%)和 S₁+S₂ (mg HC/g Rock)的关系图

Fig.3 Relationship of TOC(%) vs. S_1+S_2 (mg HC/g Rock) for the $E_2s_3^{L}$ in the Raoyang depression

200~620 ℃,升温速率为20℃/h和2℃/h,详细的 实验方法可参照戴金星(2003)和汤庆艳(2013).图 4a显示沙一下亚段源岩*R*。到0.85%时,累积生油量 达到最大为555 mg/g TOC,大于渤海湾盆地蓬莱 19-3油田的沙一段源岩的505 mg/g TOC(图 4b) (Hao *et al.*, 2009).图4c显示沙三上亚段源岩累积 生油量最大是335 mg/g TOC,沙三下亚段最大累 积生油量为590 mg/g TOC(图 4(d)).从生烃热模 拟结果来看,饶阳凹陷各段源岩都在*R*。为0.9%左 右达到最大生油量,沙一下亚段与沙三下亚段累积 生油量最大,但饶阳凹陷沙三下亚段源岩分布非常 零星,至今钻遇的井也非常少,所以它对于油气的 贡献肯定不如大面积稳定分布的沙一下亚段源岩. 与渤海湾盆地沙一段源岩横向对比,饶阳凹陷的沙 一下亚段源岩也表现出更大的生烃潜力.

以上实验结果显示饶阳凹陷的沙一下亚段源 岩具有非常大的生烃潜力,不仅是相对同凹陷的其 他层段源岩,也相对渤海湾地区的沙一段源岩,并 且有机质类型主要为 I型和 II型,平面上沙一下亚 段源岩发育也具有差异,北部的任西、马西洼槽烃 源岩质量要好于中部的河间、留西洼槽,南部的武 强洼槽沙一下亚段源岩质量差.

2.2 成熟度

烃源岩有机质成熟度研究是衡量有机质向油 气转化程度的重要参数.根据胡见义等(1991)对有 机质演化阶段的划分标准,划分沙一下亚段成熟度 变化阶段为:未成熟阶段,烃源岩埋深小于2500m, *R*₀<0.5%;低熟油阶段:烃源岩古埋深在2500~ 3500m,*R*₀在0.5%~0.7%之间;成熟阶段,埋深大



Fig.4 Relationship between products of pyrolysis and Easy $\% R_{\circ}$ of source rock samples in the Raoyang depression and Bohai Bay basin

于3500m, R。>0.70%.基于饶阳凹陷E251^L古埋深 能计算饶阳凹陷E251^L源岩整体处于未熟一低熟 油阶段,其中马西、河间一肃宁等因其构造位置 在控凹深断裂附近部分烃源岩已经进入成熟阶 段,武强洼槽沙一下亚段源岩尚未成熟,并且由 于该洼槽沙一下亚段源岩本身有机质丰度低、类 型差,认为其未经历生烃过程.

2.3 生物标志物组合特征和沉积环境

对饶阳凹陷的 30 个源岩样品进行 GC-MS 分 析, $E_2s_1^{L}$ 、 $E_2s_3^{U}$ 、 $E_2s_3^{L}$ 这 3 套源岩的典型 m/z 191 和 m/z 217 色谱图如图 5,可以看到 3 套源岩伽马蜡 烷、 C_{27} 、 C_{28} 、 C_{29} 甾烷等化合物的相对丰度都具有较 明显差异,指示了源岩的沉积环境和有机质输入的 变化.分析根据渤海湾的很多研究成果(Hao *et al.*, 2009, 2012),饶阳凹陷选择 w(姥鲛烷)/w(植烷) (Pr/Ph)、w(22S-C₃₅升霍烷)/w(22S-C₃₄升霍烷) (C₃₅/C₃₄SH)、w(C₁₉三环萜烷)/w(C₂₃三环萜烷) (C₁₉/C₂₃TT)、w(C₂₄四环萜烷)/w(C₂₆三环萜烷) (C₂₄Tet/C₂₆TT)、w(伽马蜡烷)/w(C₃₀霍烷)(G/ H)、长链三环萜烷比值 w(C₂₈+C₂₉)/w(C₂₈+C₂₉+ Ts)(ETR)、w(ΣC_{27} -C₂₉甾烷)/w(ΣC_{27} -C₃₅霍烷)(S/ H)、 $w(C_{27}$ 重排甾烷)/ $w(C_{27}$ 规则甾烷)(C_{27} Dia/ C₂₇ST)来讨论饶阳凹陷沙一下亚段源岩的生物标 志物组合特征和沉积环境(表1).

从两两生物标志物参数相关图(图6)看,Pr/ Ph、G/H、C27Dia/C27ST、C24Tet/C26TT和S/H都能 很好地区分沙一下源岩和其他两套源岩,并且指示 沙一下亚段不同于沙三段的沉积背景,冀中坳陷沙 一段沉积早期经历了二级气候变化,从沙二时期的 干旱炎热转变为低温多雨(袭著纲等,2011),Pr/ Ph低, C₂₇Dia/C₂₇ST低, ETR高, C₃₅/C₃₄SH高, G/ H高说明沉积水深小(徐建永等,2019),水体咸化, 水体底部存在分层,利于有机质保存.图6b显示沙 一下亚段源岩的 C19/C23 TT 较低但 C24 Tet/C26 TT 确较高,C24四环萜烷在高盐湖泊中大量存在,这里 出现的C₂₄ Tet/C₂₆ TT 高值和C₁₉/C₂₃ TT 低值可能 是由高盐水体引起的(Clark and Philp, 1989; Peters et al., 2005),因此还是认为沙一下亚段高等 植物贡献处于较低水平.S/H高于渤海湾盆地其 他沙一段源岩(Hao et al., 2012),说明饶阳凹陷的 沙一下亚段存在大量的浮游生物和底栖藻类,并且 高盐湖泊具有良好的保存环境,受到细菌分解程度









小,大量优质有机质得以保存.

2.4 有机相分布特征

在富油盆地中,有机相经常作为源岩生烃潜力 评价及预测的指标.基于有机质输入,沉积环境,干 酪根类型和烃类产物的组成差异,可以划分有机 相.通过预测沙一下亚段的优质源岩分布特征(殷 杰和王权,2017),结合热解、有机碳测量、生物标志物特征等实验数据确定沙一下亚段源岩的平面地球化学特征,再结合沉积环境(殷杰等,2017;Yin et al.,2018)(表2)可以将饶阳凹陷沙一下亚段源岩分为3种有机相类型.结果显示沙一下亚段主要以有机A和B相为主,烃类产物主要是油,很少有气生

Table 1Biomarker parameters of source rocks in the Raoyang depression										
井名	目台	深度 (m)	C ₁₉ /	C ₂₄ TET/ C ₂₆ TT S	C/11	D /D		C ₂₇ DiaST/	C ₃₅ /	ETR
	层型		$C_{23}TT$		5/H	Pr/Pn	G/H	$C_{27}ST$	$C_{34}SH$	
西 63	$E_2 s_1^L$	3 175.5	0.24	1.63	2.65	0.35	0.29	0.13	0.46	0.59
西 63	$E_2 s_1^L$	3 207.5	0.15	1.41	2.22	0.29	0.29	0.07	0.54	0.66
西 63	$E_2 s_1^L$	3 214.0	0.17	1.44	2.41	0.31	0.31	0.07	0.54	0.60
西 63	$E_2 s_1^L$	3 227.0	0.17	1.60	2.73	0.20	0.44	0.06	0.57	0.63
西 63	$E_2 s_1^L$	3 242.0	0.19	1.51	2.99	0.26	0.37	0.06	0.48	0.60
西 63	$E_2 s_1^L$	3 278.0	0.13	1.32	2.16	0.29	0.40	0.09	0.50	0.58
西 63	$E_2 s_1^L$	3 262.5	0.12	1.22	2.90	0.27	0.60	0.09	0.58	0.71
西 63	$E_2 s_1^L$	3 288.0	0.16	1.01	3.02	0.28	0.47	0.07	0.56	0.65
西 63	$E_2 s_1^L$	3 307.5	0.14	1.20	2.79	0.26	0.43	0.08	0.54	0.64
西 63	$E_2 s_1^L$	3 323.0	0.17	1.18	2.70	0.32	0.58	0.09	0.57	0.79
阳探1	$E_2 s_1^L$	4 036.0	0.34	1.45	2.16	0.58	0.31	0.17	0.48	0.65
阳探1	$E_2 s_1^L$	4 129.0	0.21	0.65	2.03	0.54	0.43	0.13	0.46	0.74
阳探1	$E_2 s_1^L$	4 190.5	0.19	0.59	2.99	0.51	0.36	0.25	0.63	0.67
楚深1	$E_2 s_1^L$	3 849.7	0.11	0.39	1.64	0.49	0.35	0.18	0.50	0.66
西 37	$E_2 s_1^L$	3 165.7	0.11	1.09	2.51	0.27	0.84	0.08	0.56	0.63
西 9	$E_2 s_1^L$	2 721.2	0.21	1.63	5.51	0.20	0.35	0.05	0.89	0.61
西柳11	$E_2 s_1^L$	3 424.4	0.16	1.24	3.83	0.19	0.62	0.06	0.49	0.78
西 63	$E_2 s_3^U$	3 615.0	0.22	0.81	1.47	0.64	0.27	0.26	0.46	0.45
西 63	$E_2 s_3^U$	3 710.0	0.19	0.83	1.29	0.49	0.20	0.31	0.54	0.51
西 63	$E_2 s_3^U$	3 723.5	0.23	0.99	1.17	0.45	0.22	0.29	0.46	0.47
西 63	$E_2 s_3^U$	3 744.0	0.16	0.91	1.51	0.42	0.35	0.35	0.48	0.48
阳探1	$E_2 s_3^U$	4 410.0	0.24	0.53	0.92	0.56	0.24	0.30	0.53	0.55
阳探1	$E_2 s_3^U$	4 553.5	0.23	0.60	1.04	0.64	0.21	0.23	0.53	0.57
阳探1	$E_2 s_3^U$	4 603.5	0.25	0.46	1.09	0.49	0.19	0.28	0.53	0.60
阳探1	$E_2 s_3^U$	4 675.5	0.26	0.68	1.06	0.57	0.20	0.29	0.55	0.55
阳探1	$E_2 s_3^{U}$	4 734.0	0.16	0.63	1.05	0.59	0.18	0.26	0.55	0.51
宁 302	$E_2 s_3^U$	4 131.1	0.38	0.88	1.12	0.67	0.11	0.29	0.40	0.36
宁 35	$E_2 s_3^U$	3 748.5	0.20	0.47	0.99	0.64	0.19	0.29	0.50	0.44
马 99	$E_2 s_3^L$	4 012.0	0.38	1.46	0.80	0.41	0.09	0.14	0.39	0.37
马 99	$E_2 s_3^L$	4 042.0	0.31	1.23	0.88	0.30	0.14	0.08	0.42	0.41

表1 饶阳凹陷烃源岩生物标志物参数

成.沙一下亚段源岩有机A相分布局限,原因是沙 一段早期湖泊水深小,深湖环境并不连通,主要位 于马西洼槽、任西洼槽,和留西洼槽,有机B相范围 较广,整体位于饶阳凹陷中部偏西部位,从北到南 由任丘油田至留楚油田均有分布.有机C相分布东 至蠡县斜坡东边界,西至饶阳凹陷的西侧大型控凹 断层组,北起任丘油田、南到武强油田北部位置.

3 原油的成因类型与沙一下亚段来 源油成藏分布特征

3.1 利用多元数理统计方法确定混源油不同源岩贡献

通过前文论述,利用能有效区分源岩特征的

生物标志物参数组合对原油样品进行聚类(表 3).设定距离临界值为5可以将所有原油划分为 3种成因类型,Group I,Group II和Group III.将 同类型原油与源岩进行二维生标参数组合对比 来确定每类原油的来源(图7).

Group I的原油 G/H在3类原油中最大, Pr/Ph 最小(图7a), ETR值最大(图7b), S/H最大, C₂₇DiaST/C₂₇ST较小(图7c), 从GroupI原油和源岩的生 标参数分布可以看出, Group I具有沙一下亚段源岩 的高G/H、高S/H和高ETR的特征, 并且Group I 原油样品中除了4个异常高的S/H值外, 其他参数 值都较为集中, 可以反映它的来源单一, 因此认为 Group I原油来自沙一下亚段源岩. Group II的原油

Table 2 The classification of organic facies of Es_1^{L} in the Raoyang depression (Chen <i>et al.</i> , 2018)								
有机相类型	А	В	С					
沉积环境	深湖一半深湖	半深湖一浅湖	滨岸一浅湖					
氧化还原条件	强还原	还原一弱还原	弱还原一弱氧化					
有机质来源	水生生物	混合较少陆源植物的水生生物	以陆源植物为主					
$\mathrm{TOC}(\frac{0}{2})$	>2	$1.5 \sim 4.0$	0.7~2.6					
$S_1 + S_2 (\mathrm{mg/g\ rock})$	>15	5~20	2~10					
$HI(mg/g\; {\rm TOC})$	>450	300~500	130~350					
干酪根类型	I-II	II	II-III					
烃类产物	油	主要油,少量气	油和气					

表 2 饶阳凹陷沙一下亚段有机相划分(Chen et al., 2018)

G/H在3类原油中是中等大小,Pr/Ph分布较宽 (图7a),ETR值中等(图7b),S/H中等,C₂₇DiaST/C₂₇ST分布宽(图7c).Group II整体上都处于 Group I和III之间,图7a和图7c可以看出Group II 处于3套源岩中心,并且Group II是3类原油中分 布最为分散的,这是多来源原油导致的,因此认为 Group II原油是3套源岩共同贡献.Group III的原 油G/H在3类原油中最小(图7a),Pr/Ph中等(图 7a),ETR值最小(图7b),S/H最小(图7c),C₂₇DiaST/C₂₇ST较大.Group III原油G/H小、ETR小 和S/H小的特征与沙一下亚段源岩完全相反,并 且从Group III原油的在图7的分布来看,基本处 于沙三上和下亚段源岩之间,因此认为Group III 是沙三上和下亚段源岩的混合来源.

交替最小二乘法(ALS)也是一种数理统计方法,在化合物定量工作中常被使用,Peters应用生物标志物浓度进行ALS分析确定了Prudhoe Bay油田3套源岩的相对贡献(Peters *et al.*, 2008).

根据詹兆文的ALS配比实验结果,利用单个生物标志物绝对浓度(ALS-C)比利用生标组合的比值(ALS-R)进行ALS分析的结果更准确,ALS-C计算的结果与实验配比最大误差在7%,而ALS-R的最大误差达到了60.4%(詹兆文,2016).因此本文中,利用生物标志物浓度参数进行ALS-C分析,排除一些石油地质意义不明确和浓度太小的生物标志物参数,确定了37个生物标志物参数,包括15个甾烷类和22个萜烷类生物标志物。因为研究区有3套地球化学性质差异较大的源岩,所以将端元数定为3个,计算出对于不同原油样品3个端元的各自贡献比例如图8.

计算三个端元油生物标志物比值,与源岩生物标志特征参数比值对比,图9中可以看出端元油1处于沙一下亚段源岩分布范围内,与沙一下亚段的

均值非常靠近,认为端元油1是代表沙一下亚段来 源的原油.另外根据计算结果,原油样品(SN)2是 100%的端元油1贡献,样品2是西柳油田西柳1井 沙一段原油,鉴于任西地区沙三段源岩不发育,只 有沙一下源岩发育,而且同层段成藏,生物标志物 浓度受到的影响小,因此样品2代表沙一下亚段来 源油具有地质依据,也说明端元油1的计算结果具 有合理性.端元油2与沙三上亚段源岩的均值靠近, 认为端元油2代表了沙三上亚段来源油.端元油3 与沙三下亚段源岩的均值靠近,说明端元油3代表 了沙三下亚段来源油,样品中端元油3贡献最大 的是样品 37,达到 96%,样品 37 是任丘油田任 85 井奥陶系原油,奥陶系位于任丘潜山北部,也是 潜山内幕里储层位置浅的,大部分与沙三下亚段 直接接触,沙三下亚段直接供油有地质依据,说 明端元油3的计算结果合理.与HCA分析的3类 原油对比,可以看到Group I原油端元油1从91% 到100%,与上述分析的Group I原油的单一沙一 下亚段来源相对应.Group II样品中3个端元都 有贡献与前述分析结果一致. Group III 端元油1 从0%到8%,端元油2从4%到42%,端元油3从 58%~96%,说明Group III 由沙三上、下源岩来源 组成.通过以上分析可以认为ALS-C方法的计 算结果可以在本研究中被采用.

3.2 沙-亚段来源油贡献分布特征

统计ALS-C计算结果,将原油储层位置粗分到 3个大类之中,储层位置1代表了沙河街组上覆的东 营组、馆陶和明化镇组储层,储层位置2代表沙河街 组储层,储层位置3代表前第三系储层主要包括潜 山储层包括奥陶系、寒武系、蓟县系雾迷山组.得到 饶阳凹陷不同储层位置各油田的原油成藏贡献特 征,如图10.结果显示沙一下亚段对所有原油样品 贡献58%,沙三上亚段贡献25%,沙三下亚段贡献

	Table 3 Biomarker parameters of crude oils in the Raoyang depression										
编号	井号	层位	油田	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7	R_8
1	高 30-211 斜井	$E_2 s_1$	高阳	0.14	0.86	3.93	0.22	0.47	0.08	0.52	0.71
2	西柳1	$E_2 s_1$	西柳	0.13	1.05	4.18	0.22	0.42	0.07	0.48	0.65
3	西柳10-25斜井	$E_2 s_2$	西柳	0.16	0.95	4.18	0.22	0.45	0.07	0.56	0.74
4	高 9-1 井	$E_2 s_2$	高阳	0.14	1.03	4.86	0.18	0.50	0.06	0.54	0.72
5	路 32-5井	Nm	大王庄	0.16	0.84	2.59	0.25	0.39	0.09	0.48	0.68
6	路36-30斜1井	Ng	留西	0.16	0.83	2.85	0.25	0.39	0.10	0.48	0.66
7	路 27-18井	Ng	留北	0.15	0.81	2.69	0.27	0.40	0.10	0.47	0.69
8	高 30-226 斜井	E_3d	高阳	0.12	0.73	2.61	0.26	0.38	0.09	0.51	0.74
9	留414井	E_3d	大王庄	0.14	0.84	2.96	0.24	0.42	0.11	0.54	0.67
10	间9井	E_3d	八里庄	0.17	0.85	2.57	0.25	0.40	0.09	0.46	0.66
11	宁49-5斜井	E_3d	西柳	0.13	0.70	2.31	0.28	0.37	0.09	0.50	0.72
12	任121井	$E_2 s_3$	任丘	0.29	1.17	1.79	0.29	0.31	0.11	0.51	0.60
13	任111井	$E_2 s_1$	任丘	0.22	1.30	1.82	0.30	0.35	0.13	0.52	0.61
14	马 95-28井	E_3d	南马庄	0.23	1.23	2.08	0.28	0.33	0.18	0.46	0.62
15	宁 81 井	$E_2 s_1$	八里庄	0.26	0.91	1.49	0.53	0.38	0.16	0.47	0.49
16	西 6-9 斜井	$E_2 s_1$	南马庄	0.30	1.39	1.59	0.30	0.29	0.19	0.50	0.63
17	马425井	$E_2 s_2$	南马庄	0.24	1.32	1.98	0.32	0.33	0.12	0.49	0.63
18	西 36-18井	E_3d	南马庄	0.31	1.45	1.45	0.32	0.27	0.10	0.48	0.61
19	西 20 井	Jxw	南马庄	0.35	1.32	1.44	0.33	0.28	0.15	0.46	0.65
20	任4井	Jxw	任丘	0.20	1.14	1.82	0.30	0.35	0.08	0.50	0.53
21	西31斜井	$E_2 s_2$	八里庄	0.30	1.24	2.00	0.28	0.36	0.13	0.49	0.59
22	路47-12井	$E_2 s_1$	留西	0.15	0.88	1.91	0.42	0.28	0.15	0.44	0.67
23	留 416-7 井	$E_2 s_3$	留西	0.16	0.88	2.02	0.41	0.33	0.17	0.49	0.67
24	留70-303斜井	$E_2 s_1$	大王庄	0.18	0.74	1.42	0.40	0.23	0.14	0.47	0.53
25	留 70-137 井	$E_2 s_3$	大王庄	0.19	0.57	1.60	0.42	0.43	0.20	0.53	0.53
26	楚107井	E_3d	留楚	0.19	0.72	1.72	0.38	0.38	0.15	0.48	0.53
27	间213斜井	E_3d	河间	0.25	0.86	1.78	0.50	0.32	0.11	0.45	0.49
28	宁93斜井	$E_2 s_1$	肃宁	0.16	0.64	1.38	0.35	0.23	0.11	0.44	0.48
29	强65斜井	$E_2 s_1$	武强	0.28	0.95	1.35	0.40	0.31	0.25	0.61	0.47
30	强 2-34 井	$E_2 s_2$	武强	0.33	1.13	1.41	0.42	0.34	0.22	0.54	0.49
31	强 49-9 井	Ng	武强	0.29	1.01	0.92	0.41	0.22	0.23	0.51	0.48
32	马15井	Pt_1	八里庄	0.31	1.25	1.02	0.40	0.15	0.19	0.46	0.43
33	马 851-3井	Jxw	河间	0.25	0.74	1.28	0.42	0.20	0.17	0.48	0.49
34	留67斜1井	Jxw	留北	0.23	0.66	1.13	0.48	0.17	0.20	0.51	0.44
35	任 802	\in	任丘	0.28	1.31	0.90	0.43	0.17	0.20	0.45	0.40
36	宁古 8-3 斜 1 井	Jxw	肃宁	0.45	1.27	0.72	0.38	0.07	0.15	0.43	0.36
37	任 85 井	0	任丘	0.35	1.61	0.63	0.35	0.12	0.12	0.44	0.38

表3 饶阳凹陷原油生物标志物参数

注:O代表奧陶系;∈代表寒武系;Jxw代表中元古蓟县系;Pt1代表古元古界;R1代表C19/C23TT;R2代表C24TET/C26TT;R3代表S/H;R4代表Pr/Ph;R5代表C/H;R6代表C27DiaST/C27ST;R7代表C35/C34SH;R8代表ETR

17%.利用烃源岩热模拟结果和地温演化史计算烃 源岩至今的生烃量,结果显示饶阳凹陷三套烃源岩 总生油量为52.415×10⁸t,沙一下亚段共生油 34.078×10⁸t,占饶阳凹陷总生油量的65%,其次是 沙三上亚段烃源岩占27%,沙三下亚段占8%,说明 ALS-C计算结果具有较匹配的生烃物质条件.考虑 到 ALS-C 的误差,将单一端元达到 90% 贡献的样 品作为单一源岩贡献原油.单一的沙一下来源油样 品分布于西柳和高阳油田和八里庄、薛庄、大王庄、 留西和留北油田的储层1中,高阳和西柳地区是由 于仅发育沙一下亚段源岩,而其他地区没有沙三段 来源是因为原油近源成藏,洼槽区深陷,砂岩主要





图8 饶阳凹陷原油ALS-C分析结果

Fig.8 Analytic results of crude oil in the Raoyang depression by using ALS-C

B代表八里庄油田,D代表大王庄油田,G代表高阳油田,H代表河间油田,L_b代表留北油田,L_c代表留楚油田,L_x代表留西油田,N代表南马 庄油田,R代表任丘油田,S代表肃宁油田,X代表西柳油田;层位1代表了东营组、馆陶和明化镇组储层;层位2代表沙河街组储层,层位3代表 前第三系储层主要包括潜山储层包括奥陶系、寒武系、蓟县系雾迷山组



Fig.9 Relationship between caculated by ALS-C biomarker ratio of crude oils and ratio of source rocks in the Raoyang depression



Fig.10 Distribution charcteristics of accumulation contribution of source rocks in the Raoyang depression

来自两侧重力流湖底扇,砂体零星分布,不能通过 连通的砂体实现油气浮力作用的垂向运移,另外源 内多是泥页岩,脆性小,能形成有效地垂向裂缝难 度大,虽然调节断层在源内存在,但沙三段在东营 组沉积中后期第一次成藏时(29~27 Ma)断裂活动 强烈,油气容易直接通过断层到地面溢散,第二次 成藏时沙一下亚段源岩也进入了成熟期,生烃活动 使得层内压力增大,容易形成超压封堵,加上区域 性盖层东三组经过压实作用也变得更加致密, 使沙 三段来源油向上运移至储层1中非常困难(赵贤正 等,2017).但是南马庄,河间油田的储层1混入了沙 三段来源油,这是由于油田圈闭位于洼槽边缘控凹 断层的上升盘正向构造,具有砂体一断层输导体 系, 控凹断层向下深切沟通所有源岩, 陡直的断裂 产状容易在下降盘洼槽内形成近岸的水下扇砂体, 由此汇聚油气,油气通过断层再实现垂向运移(赵 贤正等,2017). 南部的留楚油田和武强在储层1中 也发现了沙三段原油贡献,这与饶阳凹陷从北至南 断裂活动停止时间越来越晚有关,留楚武强地区停 止活动时间距今约5 Ma,匹配的断裂活动时期让 沙三来源油突破盖层,可以实现储层1中成藏 (蒋有录等,2015).储层2除了高阳和西柳油田, 都是沙一下和沙三段混源来源.储层3除了南马 庄油田,没有沙一下亚段来源油.通过计算储层 1中沙一下亚段总贡献率达到77%,储层2中达 到 66%,表明沙一下亚段源岩基本控制着储层1 和2中的原油分布,但控制程度决定于贡献的比 例.沙一下亚段来源油能贡献50%以上的样品, 包括任丘、大王庄、留西、留北、南马庄油田都集 中在有机A相附近,贡献小于50%的样品来自肃 宁一河间油田、留楚、武强油田,都距离有机A相 有一定距离,说明沙一下亚段的有机A相决定着 混源油中沙一下亚段来源的贡献高低.

4 结论

(1)饶阳凹陷沙一下亚段源岩是一套大面积分 布的优质源岩,有机质类型以I和II为主,生烃热模 拟潜力显示其是饶阳凹陷三套源岩中最好的,同时 也是渤海湾盆地中较好的沙一段源岩.

(2)沙一下亚段主要以高的w(伽马蜡烷)/w
(C₃₀ 藿烷)、w(22S-C₃₅升霍烷)/w(22S-C₃₄升霍烷)、
ETR、w(甾烷)/(藿烷)和低的w(C₁₉三环萜烷/C₂₃
三环萜烷)区别于其他两套源岩.

(3)通过 HCA 方法识别出3类原油,其中 Group I是沙一下亚段唯一贡献,Group II是沙一下 亚段和沙三段混合来源,Group III是没有沙一下亚 段来源,只有沙三源岩贡献.

(4)通过ALS-C方法定量评价每个原油样品 的贡献比例.结果显示洼槽区内馆陶、东营组和 沙河街组原油大概率是沙一下亚段来源为主,而 混源油中沙一下亚段贡献比例超过50%样品都 紧靠沙一下亚段源岩有机A相,有机相与成藏贡 献大小紧密相关.

References

- Clark, J. P., Philp, R. P., 1989. Geochemical Characterization of Evaporite and Carbonate Depositional Environments and Correlation of Associated Crude Oils in the Black Creek Nasin, Alberta. *Canadian Petroleum Geologists Bulletin*, 37:401-416.
- Chen, X. Y., Hao, F., Guo, L. X., et al., 2018. Characteristic of Source Rocks and Origin of Crude Oils in the Raoyang Sag and Baxian Sag, Bohai Bay Basin, China: Insights from Geochemical and Geological Analyses. *Marine and Petroleum Geology*, 97: 407-421. https:// doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2018.07.015
- Dai, J. X., Chen, J. F., Zhong, N. N., et al., 2003. Large Sized Gas Fields and their Sources. Science Press, Beijing, 15(in Chinese).
- Gong, Z. G., Guo, J. X., Zhao, X. Y., 2011. Palaeoecological Analysis of Paleogene Shahejie Formation in North Central Raoyang Sag of Central Hebei Depression. Journal of Earth Sciences and Environment, 33(4):358-363 (in Chinese with English abstract).
- Hao, F., Zou, H. Y., Gong, Z. S., et al., 2007. Petroleum Migration and Accumulation in the Bozhong Sub-Basin, Bohai Bay Basin, China: Significance of Preferential Petroleum Migration Pathways (PPMP) for the Formation of Large Oilfields in Lacustrine Fault Basins. *Marine and Petroleum Geology*, 24(1): 1-13. https://doi.org/ 10.1016/j.marpetgeo.2006.10.007
- Hao, F., Zhou, X. H., Zhu, Y. M., et al., 2009. Charging of the Neogene Penglai 19-3 Field, Bohai Bay Basin, China: Oil Accumulation in a Young Trap in an Active Fault Zone. AAPG Bulletin, 93(2): 155-179. https:// doi.org/10.1306/09080808092
- Hao, F., Zhou, X. H., Zhu, Y. M., et al., 2010. Charging of Oil Fields Surrounding the Shaleitian Uplift from Multiple Source Rock Intervals and Generative Kitchens, Bohai Bay Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, 27(9): 1910–1926. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2010.07.005
- Hao, F., Zhou, X. H., Zhu, Y. M., et al., 2012. Lacustrine Source Rock Deposition in Response to Co-Evolution of Environments and Organisms Controlled by Tectonic Subsidence and Climate, Bohai Bay Basin, China. Organic Geochemistry, 42(4): 323-339. https://doi.org/ 10.1016/j.orggeochem.2011.01.010
- Hu, J. Y., Huang, D. F., et al., 1991. The Elementary The-

ory of Continental Petroleum Geology in China. Petroleum Industry Press, Beijing(in Chinese).

- Jiang, Y. L., Liu, P., Song, G. Q., et al., 2015. Late Cenozoic Faulting Activities and Their Influence upon Hydrocarbon Accumulations in the Neogene in Bohai Bay Basin. Oil and Gas Geology, 36(4): 525-533(in Chinese with English abstract).
- Liu, 1 H., Jiang, Y. I., Xu, H. Q., et al., 2011. Accumulation Mechanisms and Modes of Neogene Hydrocarbons in Jizhong Depression. Acta Petrolei Sinica, 32(6):928-936(in Chinese with English abstract).
- Peters, K. E., Walters, C.C., Moldowan, J. M., 2005. The Biomarker Guide, Biomarkers and Isotopes in Petroleum Exploration and Earth History. Cambridge University Press, Cambridge, 566-567.
- Peters, K. E., Scott Ramos, L., Zumberge, J. E., et al., 2008. De-Convoluting Mixed Crude Oil in Prudhoe Bay Field, North Slope, Alaska. Organic Geochemistry, 39(6): 623– 645. https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2008.03.001
- Tian, F. Q., 2008. The Study on Classification and Origin of Crude Oils. *Journal of Oil and Gas Technology* (2):51-52+66(in Chinese with English abstract).
- Tang, Q. Y., Zhang, M. J., Zhang, T. W., et al., 2013. A Review on Pyrolysis Experimentation on Hydrocarbon Generation. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 35(1): 52-62(in Chinese with English abstract).
- Wang, J., Ma, S. P., Li, X., et al., 2009. Characteristics of Crude Oils and Oil-Source Rock Correlation. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 35(9): 117-120(in Chinese with English abstract).
- Xu, J. Y., Zhu, X. F., Song, Y., et al., 2019. Geochemical Characteristics and Oil-Source Correlation of Paleogene Source Rocks in the South Yellow Sea Basin. *Earth Science*, 44(3):848-858(in Chinese with English abstract).
- Yang, F., 2016. The Organic Geochemical Characteristics of Source Rocks and Origin of Oil and Gas in Baxian and Raoyang Depression (Dissertation). China University of Petroleum, Beijing(in Chinese with English abstract).
- Yang, Y. H., Zhang, G. C., Shen, P., et al., 2018. Formation Conditions and Exploration Direction of Large Gas Field in Bozhong Sag of Bohai Bay Basin. Acta Petrolei Sinica, 39(11): 1199-1210(in Chinese with English abstract).
- Yi, S. W., Jiang, Y. L., Fan, B. D., et al., 2010. Neogene Petroleum Source and Characteristic of Paleogene Hydrocarbon Source Rock in the Raoyang Sag, Bohai Bay Basin. *Petroleum Geology and Experiment*, 32(5):475-

479(in Chinese with English abstract).

- Yin, J. Wang, Q., 2017. Using Seismic and Log Information to Identify and Predict High - Quality Source Rocks: A Case Study of the First Member of Shahejie Formation in Raoyang Sag, Bohai Bay Basin. Natural Gas Geoscience, 28(11): 1761-1770(in Chinese with English abstract).
- Yin, J., Wang, Q., Hao, F., et al., 2017. PalaeolakeEnvironment and Depositional Model of Source Rocks of the Lower Submember of Sha1 in Raoyang Sag, Bohai Bay Basin. *Earth Science*, 42(7):1209-1222(in Chinese with English abstract).
- Yin, J., Wang, Q., Hao, F., et al., 2018. Palaeoenvironmental Reconstruction of Lacustrine Source Rocks in the Lower 1st Member of the Shahejie Formation in the Raoyang Sag and the Baxian Sag, Bohai Bay Basin, Eastern China. *Palaeogeography*, *Palaeoclimatology*, *Palaeoecology*, 495: 87-104. https://doi.org/10.1016/ j.palaeo.2017.12.032
- Zhan, Z. W., 2016. De-Convoluting the Marine Crude Oil Mixtures in the Taibei Uplift, Tarim Basin, NW China (Dissertation). University of Chinese Academy of Sciences, Guangzhou(in Chinese with English abstract).
- Zhao, L. J., Jiang, Y. L., Liu, H., et al., 2012b. Characteristics of Neogene Formation Water and Its Response to Hydrocarbon Distribution in Liuxi-Liubei Area of Raoyang Sag. Journal of Earth Sciences and Environment, 36 (5):25-31(in Chinese with English abstract).
- Zhao, L. J., Jiang, Y. L., Pang, Y. M., et al., 2012a. Sealing Ability of Cap Rock and Its Relationship with Hydrocarbon Distribution of Neogene in Raoyang Sag. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 36(5): 25-31(in Chinese with English abstract).
- Zhao, X. Z., Jiang, Y. L., Jin, F. M., 2017. Hydrocarbon Accumulation Mechanism and Model of Sub-Sags in Hydrocarbon-Rich Sag: aCase Study of RaoyangSag in Jizhong Depression. Acta Petrolei Sinica, 38(1): 67-76 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 戴金星,陈践发,钟宁宁,等,2003.中国大气田及其气源. 北京:科学出版社,15.
- 胡见义,黄第藩,等,1991.中国陆相石油地质理论基础.北 京:石油工业出版社.
- 蒋有录,刘培,宋国奇,等,2015.渤海湾盆地新生代晚期断 层活动与新近系油气富集关系.石油与天然气地质,36 (4):525-533.

- 刘华,蒋有录,徐昊清,等,2011.冀中坳陷新近系油气成藏 机理与成藏模式.石油学报,32(6):928-936.
- 田福清,2008.饶阳凹陷武强地区原油族群划分与油源研究. 石油天然气学报,(2):51-52+66.
- 汤庆艳,张铭杰,张同伟,等.2013.生烃热模拟实验方法述 评.西南石油大学学报(自然科学版),35(1):52-62.
- 王建,马顺平,李欣,等,2009. 饶阳凹陷原油特征及油源对 比.内蒙古石油化工,35(9):117-120.
- 袭著纲,国景星,赵晓颖,2011. 冀中坳陷饶阳凹陷中北部 古近纪沙河街组古生态分析.地球科学与环境学报, 33(4):358-363.
- 徐建永,朱祥峰,宋宇,等,2019.南黄海盆地古近系烃源岩 地球化学特征及油源对比.地球科学,44(3):848-858.
- 谢玉洪,张功成,沈朴,等,2018.渤海湾盆地渤中凹陷大气田 形成条件与勘探方向.石油学报,39(11):1199-1210.
- 杨帆,2016. 饶阳-霸县凹陷烃源岩有机地球化学特征与油 气来源(硕士学位论文). 北京:中国石油大学.
- 易士威,蒋有录,范炳达,等,2010.渤海湾盆地饶阳凹陷古 近系源岩特征与新近系油气来源.石油实验地质,32

(5):475-479.

- 殷杰, 王权, 2017.利用测井和地震信息识别和预测优质烃 源岩——以渤海湾盆地饶阳凹陷沙一段为例.天然气 地球科学, 28(11):1761-1770.
- 殷杰, 王权, 郝芳, 等, 2017. 渤海湾盆地饶阳凹陷沙一下亚 段古湖泊环境与烃源岩发育模式. 地球科学, 42(7): 1209-1222.
- 詹兆文,2016. 塔里木盆地塔北隆起带海相混源油地球化学 解析(博士学位论文). 广州:中国科学院研究生院.
- 赵利杰,蒋有录,庞玉茂,等,2012a. 饶阳凹陷新近系盖层质 量及其与油气分布的关系.中国石油大学学报(自然科 学版),36(5):25-31.
- 赵利杰,蒋有录,刘华,等,2012b.饶阳凹陷留西——留北地 区新近系地层水特征及其与油气分布的关系.地球科 学与环境学报,34(2):57-63.
- 赵贤正,蒋有录,金凤鸣,等,2017. 富油凹陷洼槽区油气成 藏机理与成藏模式——以冀中坳陷饶阳凹陷为例.石 油学报,38(1):67-76.